



DEUTSCHES
PATENTAMT

BC

21 Aktenzeichen: P 44 16 901.9
22 Anmeldetag: 13. 5. 94
43 Offenlegungstag: 16. 11. 95

DE 44 16 901 A 1

71 Anmelder:
EOS GmbH Electro Optical Systems, 82152 Planegg,
DE

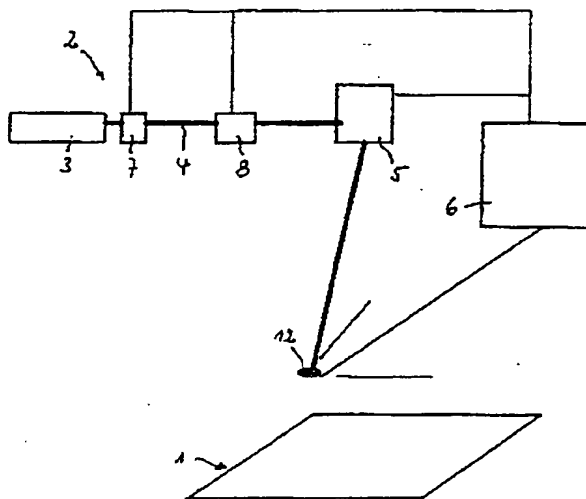
74 Vertreter:
Prüfer und Kollegen, 81545 München

72 Erfinder:
Serbin, Jürgen, 82166 Gräfelfing, DE; Reichle,
Johannes, 81375 München, DE; Langer, Hans J., Dr.,
82166 Gräfelfing, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 **Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts**

57 Bei der Herstellung eines Objekts durch aufeinanderfolgendes Verfestigen von Materialschichten 1 an den jeweiligen dem Objekt entsprechenden Stellen tritt das Problem auf, daß die Herstellungsgeschwindigkeit beschränkt ist, da bei einer für die genaue Auflösung benötigten Bündelung des zur Verfestigung verwendeten Lichtstrahls 4 die Scan-Geschwindigkeit, mit der der Lichtstrahl über die Materialschichten 1 geführt wird, nicht beliebig erhöht werden kann. Dieses Problem wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, daß im Lichtstrahl 4 eine variable Fokuseinheit 8 vorgesehen ist, mittels der die Bündelung des Lichtstrahls 4 bei der Verfestigung einer Schicht 1 verändert wird; damit kann in verschiedenen Bereichen der Schicht 1 mit unterschiedlicher Fokussierung und Scan-Geschwindigkeit gearbeitet werden.



DE 44 16 901 A 1

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 bzw. ein Verfahren nach dem Oberbegriff des Anspruchs 17.

Eine derartige Vorrichtung bzw. ein derartiges Verfahren ist unter dem Begriff "Stereographie" bekannt und kann, wie beispielsweise in der EP-A-0 171 069 beschrieben, durch schichtweises Verfestigen eines flüssigen, photopolymerisierbaren Materials mittels eines gebündelten Laserstrahls erfolgen. Ebenso kann dieses Verfahren auch durch Sinterung von Pulver mittels des Laserstrahls durchgeführt werden (siehe EP-A-0 287 657). In allen Fällen tritt das Problem auf, daß die Herstellungsgeschwindigkeit nicht beliebig erhöht werden kann, da bei vorgegebener Bündelung des Laserstrahls eine vom Typ des Lasers und des zu verfestigenden Materials abhängige Scan-Geschwindigkeit des Laserstrahls nicht überschritten werden kann. Auch kann eine eventuelle Dejustierung des Laserstrahls nicht festgestellt werden.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, die Geschwindigkeit und Genauigkeit bei der Herstellung des Objekts zu verbessern. Ferner soll ein effizienter Betrieb auch bei Einsatz von gepulsten Lasern möglich sein.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruchs 1 bzw. durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 17 gelöst.

Erfindungsgemäß läßt sich die Bündelung des zur Verfestigung verwendeten Strahls verändern und messen, sodaß je nach dem zu verfestigenden Bereich der Schichten, dem Typ des verwendeten Lasers und des Materials jeweils eine bezüglich der Herstellungsgeschwindigkeit und Genauigkeit optimale Bündelung und Ausrichtung des Strahls eingestellt werden kann. Ferner kann eine eventuelle Verstaubung oder Dejustierung der Optik, ein Defekt der optischen oder elektronischen Komponenten zur Einstellung des Strahls und eine Strahländerung aufgrund von Alterungserscheinungen festgestellt, angezeigt und gegebenenfalls korrigiert werden.

Die Erfindung wird im weiteren anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezug auf die Figuren beschrieben. Von den Figuren zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung der erfindungsgemäßen Vorrichtung;

Fig. 2 eine Darstellung des Prinzips zur Veränderung der Bündelung des Strahls;

Fig. 3 eine Darstellung der je nach zu verfestigendem Bereich unterschiedlichen Bündelung des Strahls vorzugsweise bei Verwendung eines gepulsten Lasers;

Fig. 4 eine perspektivische, schematische Darstellung einer Positioniervorrichtung für einen erfindungsgemäßen Sensor;

Fig. 5 eine Darstellung einer ersten Ausführungsform des Sensors; und

Fig. 6 eine Darstellung einer zweiten Ausführungsform des Sensors.

Die Darstellung der erfindungsgemäßen Vorrichtung in Fig. 1 zeigt eine Schicht 1 eines mittels elektromagnetischer Strahlung verfestigbaren Materials, beispielsweise einer polymerisierbaren Flüssigkeit oder Paste oder eines sinterbaren Pulvermaterials, sowie eine über dieser Schicht 1 angeordnete Vorrichtung 2 zum Verfestigen des Materials der Schicht 1 an dem herzustellenden Objekt entsprechenden Stellen. Die Verfestigungs-

vorrichtung 2 weist eine Strahlungsquelle 3 in Form eines Lasers auf, die einen gebündelten Lichtstrahl 4 auf eine Ablenkeinrichtung 5 richtet, mittels der der Lichtstrahl 4 auf die gewünschten Stellen der Schicht 1 abgelenkt werden kann. Zu diesem Zweck ist die Ablenkeinrichtung mit einer Steuereinheit 6 zur entsprechenden Steuerung der Ablenkeinrichtung 5 verbunden.

Zwischen der Strahlungsquelle 3 und der Ablenkeinrichtung 5 ist im Lichtstrahl 4 nacheinander ein Modulator 7 und eine variable Fokuseinheit 8 angeordnet, die ebenfalls mit der Steuereinheit 6 zur Steuerung in der weiter unten beschriebenen Weise verbunden sind. Der Modulator kann beispielsweise als akusto-optischer, elektro-optischer oder mechanischer Modulator ausgebildet sein und dient als "Schalter" zum Durchschalten bzw. Unterbrechen des Strahls 4.

Die variable Fokuseinheit 8 dient dazu, die Bündelung des Strahls 4 zu verändern. Zu diesem Zweck weist sie in der in Fig. 2 genauer dargestellten Weise in Richtung des Strahls 4 eine Zerstreuungslinse 9 und nachfolgend eine Sammellinse 10 auf. Die Sammellinse ist in Richtung des Strahls 4 beispielsweise zwischen der gestrichelten Position in Fig. 2 und der in durchgezogenen Linien gezeichnete Position positionierbar und bewirkt damit je nach ihrer Position eine Veränderung der Fokus und damit des Durchmessers des Strahls an einer Arbeits- oder Referenzebene 11, die beispielsweise die Oberfläche der Schicht 1 sein kann. Die Verschiebung der Sammellinse 10 erfolgt durch einen (nicht gezeigten) Verschiebevorrichtung unter Verwendung eines Schrittmotors oder Servomotors, die mit der Steuereinheit 6 verbunden ist. Anstelle der Anordnung mit zwei Linsen 9, 10 kann auch jede andere geeignete Mehrlin senanordnung verwendet werden, bei der die Fokusveränderung durch Verschieben von 2 Linsen relativ zueinander erfolgt.

Zwischen der Ablenkeinrichtung 5 und der Schicht 1 ist ferner ein Sensor 12 angeordnet, der mittels der in Fig. 4 näher dargestellten Positioniervorrichtung 13 in einer Ebene parallel zu und vorzugsweise unmittelbar oberhalb der Schicht 1 an jede Stelle oberhalb der Schicht 1 verschoben werden kann. Die Positioniervorrichtung 13 ist als x,y-Positioniervorrichtung ausgebildet, wobei der Sensor 12 in einer ersten X-Richtung entlang der Oberseite eines sich in X-Richtung über die Schicht 1 erstreckenden Abstreifers 14 verschiebbar ist, der wiederum in Y-Richtung über die Schicht 1 zum Einstellen einer gewünschten Schichtdicke des Materials verschoben werden kann. Gemäß einer anderen Ausführungsform kann der Sensor aber auch unabhängig vom Abstreifer positioniert werden. Der Ausgang des Sensors ist mit der Steuereinheit 6 verbunden.

Eine erste Ausführungsform des Sensors 12 ist in Fig. 5 dargestellt. Der Sensor 12 nach Fig. 5 ist als Quadrantensensor mit einer in jedem Quadranten angeordneten Photodiode 15, 16, 17, 18 ausgebildet. Die Photodiode 18 eines Quadranten ist mittels eines strahlungsundurchlässigen Metallplättchens 19 abgedeckt, in deren Mitte sich eine Blendenöffnung 20 befindet. Gemäß einer in Fig. 6 gezeigten zweiten Ausführungsform ist der Sensor 12 als Einzelsensor mit nur einem einzigen Feld ausgebildet, wobei in dem Feld eine Photodiode 21 angeordnet ist, die wiederum mit einem strahlungsundurchlässigen Metallplättchen bis auf eine zentrale Blendenöffnung 23 abgedeckt ist. Der Durchmesser der Blendenöffnungen 20, 23 ist etwa 20 bis 50 µm, vorzugsweise etwa 35 µm.

Im Betrieb wird zunächst der Laserstrahl 4 bezüglich

seiner Position, Leistung und seines Durchmessers gemessen. Die Positionsbestimmung erfolgt dabei beispielsweise mittels des in Fig. 5 gezeigten Sensors 12 dadurch, daß der Sensor 12 an einer bestimmten definierten X,Y-Stelle positioniert wird und die Ablenkeinrichtung 5 von der Steuereinheit 6 so gesteuert wird, daß der abgelenkte Strahl 4 den Sensor 12 überstreicht und dabei vom Feld der Photodiode 15 zu dem der Photodiode 16 wandert. Dabei werden die von beiden Photodioden abgegebenen Ausgangssignale verglichen; bei Gleichheit entspricht die Position des Strahls 4 genau dem Übergang zwischen den beiden Photodiodenfeldern und damit der Mittenposition des Sensors 12. Dieselbe Messung wird auch für den Übergang von der Photodiode 15 zur Photodiode 17 vorgenommen. Durch Vergleich der erhaltenen Positionsdaten mit der entsprechenden Positionsvorgabe für die Ablenkeinrichtung 5 wird festgestellt, ob die Steuerung für den Strahl 4 korrekt ist oder ob eine Dejustierung vorliegt. Im letzteren Fall wird eine Korrektur der Steuerung in der Steuereinheit 6 oder auch eine Neujustage der Vorrichtung vorgenommen. Die Positionsmessung wird durch Verfahren des Sensors 12 an über die Schichtoberfläche 1 verteilte Positionen mittels der Positioniervorrichtung 13 an beliebigen Stellen innerhalb des Belichtungsfeldes vorgenommen, sodaß die Positioniergenauigkeit der Verfestigungsvorrichtung 2 exakt bestimmbar ist. Ebenso ist es allerdings auch möglich, nur an ausgewählten Punkten, beispielsweise an 2 Punkten, zu messen, um eine globale Drift beispielsweise aufgrund von Temperaturänderungen festzustellen. Diese kann wiederum durch entsprechende Korrektur der Steuereinheit 6 bzw. der darin gespeicherten Steuersoftware kompensiert werden.

Die Leistung des Strahls 4 kann durch direkte Auswertung der Ausgangssignale der Photodioden 15, 16 und 17, deren Amplitude der Leistung entspricht, vorgenommen werden. Durch Vergleich mit Sollwerten kann wiederum ein Fehler in der Verfestigungsvorrichtung 2 festgestellt werden, beispielsweise eine Verstaubung der Optik, eine Alterung oder auch ein Ausfall von optischen oder elektronischen Komponenten.

Für die Messung des Durchmessers bzw. des Fokus des Strahls 4 wird die Ablenkeinrichtung 5 und/oder die Positioniervorrichtung 13 so gesteuert, daß der abgelenkte Strahl 4 die Blendenöffnung 20 des Sensors nach Fig. 5 oder die Blendenöffnung 23 des Sensors nach Fig. 6 in zwei Koordinatenrichtungen überstreicht. Dadurch wird das Intensitätsprofil des Strahls 4 abgetastet und aus den gewonnenen Intensitätsdaten des Profils der Fokus bzw. Durchmesser des Strahls 4 berechnet. Diese Messung kann im gesamten Belichtungsfeld oder auch nur an ausgewählten Punkten, beispielsweise in Verbindung mit der Leistungsmessung, durchgeführt werden. Durch Vergleich mit entsprechenden Sollwerten kann wiederum eine Abweichung beispielsweise aufgrund der Alterung des Lasers oder einer Dejustage des optischen Systems festgestellt werden. In diesem Fall kann in gewissem Rahmen eine Korrektur durch Veränderung des Fokus mittels Ansteuerung der variablen Fokuseinheit 8 vorgenommen werden.

Bei Verwendung des in Fig. 6 gezeigten Sensors 12 wird die Position und Leistung des Strahls 4 aufgrund von Berechnungen ermittelt, und zwar die Position durch Bestimmung des Intensitätsmaximums und die Leistung durch Integration des Profils. Derartige Rechenverfahren sind bekannt, sodaß sie hier nicht näher erläutert werden müssen.

Nach der Einstellung und Messung des Strahls 4 wird eine Materialschicht 1 aufgetragen und durch gezieltes Bestrahlen der Schicht 1 mittels des abgelenkten Strahls 4 an den dem Objekt entsprechenden Punkten verfestigt. In Fig. 3 ist ein Bereich 24 dargestellt, der beispielhaft die zu verfestigenden Stellen des Objekts dieser Schicht umfassen soll. Dieser Bereich wird für die Verfestigung in einen äußeren Hüllbereich 25 und einen inneren Kernbereich 26 aufgeteilt, wobei der Hüllbereich 25 den Kernbereich 26 vorzugsweise vollständig umschließt. Zur Verfestigung steuert die Steuereinheit 6 die variable Fokuseinheit 8 und die Ablenkeinrichtung 5 derart, daß die Schicht 1 in der in Fig. 3 durch die kleinen Kreise angedeuteten Weise im Hüllbereich 25 mit einem kleinen Strahldurchmesser bzw. Fokus und im Kernbereich 26, angedeutet durch die größeren Kreise, mit einem größeren Strahldurchmesser bzw. Fokus bestrahlt wird. Damit wird im Hüllbereich eine feinere und genauere Verfestigung des Materials im Hüllbereich 25, der die Oberfläche bzw. Kontur des Objekts bildet, erreicht. Wird gleichzeitig gemäß einer bevorzugten Weiterbildung die Ablenkeinrichtung 5 so gesteuert, daß die Geschwindigkeit, mit der der abgelenkte Strahl 4 über die Schicht 1 streicht (d. h. die Scan-Geschwindigkeit), im Kernbereich 26 höher als im Hüllbereich 25 ist, dann läßt sich auch die Herstellungszeit wesentlich verkürzen. Diese Maßnahme ist insbesondere bei hohen Leistungen des Lasers 3 sinnvoll, da dann auch bei größerem Strahldurchmesser oder Fokus eine ausreichende Leistungsdichte vorhanden ist, um eine Verfestigung auch bei höherer Scangeschwindigkeit zu erreichen. Bei Einsatz einer Strahlungsquelle mit einstellbarer Leistung kann in diesem Fall die Leistung bei der Verfestigung des Hüllbereichs 25 verringert werden, um die Energie- bzw. Leistungsdichte auf einen für die Verfestigung geeigneten Wert einzustellen.

Eine besonders bevorzugte Anwendung findet das oben beschriebene Verfahren bei Verwendung eines gepulsten Lasers als Strahlungsquelle 3. Die Pulsrate derartiger Laser ist in der Regel zu niedrig, um bei kleinem Fokus hohe Scangeschwindigkeiten zu erzielen. Vielmehr werden dann nur noch einzelne voneinander beabstandete Stellen verfestigt. Andererseits nimmt die mittlere Leistung dieser Laser ab einer bestimmten Pulsrate ab. Weiterhin ist die Pulsdauer von beispielsweise frequenzvervielfachten FK-Lasern sehr kurz (ca. 30ns). Die Einstellung der in das Material eingebrachten Energie- bzw. Leistungsdichte ist nicht mehr über die Scangeschwindigkeit, sondern nur noch durch Abschwächung, die Repetitionsrate des Lasers und/oder die Einstellung des Strahldurchmessers möglich. Für einen Betrieb mit größtmöglicher Effizienz hat sich erfindungsgemäß die Einstellung des Strahldurchmessers herausgestellt. Für einen vorgegebenen Wert des Strahldurchmessers ergibt sich dann eine optimale Repetitionsrate in Verbindung mit einer optimalen Scangeschwindigkeit.

Erfindungsgemäß wird damit zur Erzielung einer kurzen Herstellungszeit bei gepulsten Lasern im Hüllbereich 25 mit kleinerem Fokus und im Kernbereich 26 mit größerem Fokus verfestigt und die Scangeschwindigkeit jeweils so eingestellt, daß in beiden Bereichen die bei jedem Puls verfestigten Bereiche 27 überlappen und damit eine durchgehende Linie verfestigt wird. Dieser Sachverhalt ist in Fig. 3 dargestellt: da die damit zulässige Scangeschwindigkeit proportional zum Durchmesser des in Fig. 3 kreisförmig dargestellten Strahls oder Fokus 27 ist, kann die Scangeschwindigkeit im Kernbe-

reich 26 gegenüber derjenigen des Hüllbereichs 25 um denselben Faktor erhöht werden, um den der Durchmesser im Kernbereich vergrößert ist. Außerdem sind im Kernbereich 26 auch entsprechend weniger Überstreichungen erforderlich. Damit reduziert sich die Herstellungszeit mit dem Quadrat der relativen Durchmesser-
 5 vergrößerung. In beiden Bereichen 25, 26 ergibt sich aus der entsprechenden Scangeschwindigkeit die Repetitionsrate und damit mittlere Leistung des Lasers, so daß im Ergebnis im Hüllbereich 25 mit kleinerer mittlerer Leistung und im Kernbereich 26 mit größerer mittlerer Leistung gefahren wird.

Zur Einstellung des Fokus wird von der Steuereinheit 6 je nachdem, ob die Ablenkeinrichtung 5 den Strahl 4 gerade auf den Kernbereich 26 oder den Hüllbereich 25
 15 ablenkt, die Position der Sammellinse 10 relativ zur Zerstreuungslinse durch Axialverschiebung verändert. Die entsprechenden Steuerdaten sind in der Steuereinheit 6 gespeichert. Vorzugsweise wird zunächst mit einer kleinen Fokuseinstellung der Hüllbereich 25 verfestigt, danach der Fokus vergrößert und mit der einmal eingestellten Vergrößerung der Kernbereich 26 verfestigt. Eine Messung und Korrektur der Fokuseinstellung des Strahls ist wiederum mittels des Sensors 12 in der oben dargelegten Weise möglich.

Die weiteren Schichten des Objekts werden in der gleichen Weise aufgetragen und verfestigt.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Herstellung eines dreidimensionalen Objekts durch aufeinanderfolgendes Verfestigen von Schichten eines durch Einwirkung elektromagnetischer Strahlung verfestigbaren Materials, mit einer Vorrichtung zum Erzeugen einer Schicht (1) des Materials, einer Strahlungsquelle (3) zur Erzeugung eines gebündelten Strahls (4) der elektromagnetischen Strahlung und einer Ablenkvorrichtung (5) zum Ablenken des gerichteten Strahls (4) auf dem Objekt entsprechende Stellen der Schicht (1), dadurch gekennzeichnet, daß im Strahl (4) eine variable Fokuseinheit (8) zur Veränderung der Bündelung des Strahls (4) angeordnet ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die variable Fokuseinheit (8) zwischen der Strahlungsquelle (1) und der Ablenkvorrichtung (5) angeordnet ist.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die variable Fokuseinheit (8) im Strahl zwei in Axialrichtung relativ zueinander verschiebbare Linsen (9, 10) aufweist.
4. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß im Strahl (4) ein Modulator (7) zum gesteuerten Unterbrechen bzw. Durchlassen des Strahls angeordnet ist.
5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die variable Fokuseinheit (8) und die Ablenkvorrichtung (5) und gegebenenfalls der Modulator (7) mit einer Steuereinheit (6) zur Veränderung des Fokus des Strahls (4) in Abhängigkeit von der Ablenkung verbunden sind.
6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Strahlungsquelle (3) einen Laser aufweist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Laser als gepulster Laser ausge-

bildet ist.

8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen der Ablenkeinrichtung (5) und der Schicht (1) ein Sensor (12) zur Messung des Strahls (4) angeordnet ist.

9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) mit einer Positionier-
 10 vorrichtung (13) zum Positionieren des Sensors an einer Mehrzahl von Stellen in einer Ebene parallel zur Schicht (1) verbunden ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Positioniervorrichtung (13) als x,y-Positioniervorrichtung ausgebildet ist.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß eine sich in einer ersten Richtung (X) quer über die Schicht (1) erstreckende und in einer zweiten Richtung (Y) über die Schicht (1) ver-
 15 fahrbare Abstreifvorrichtung vorgesehen ist und daß der Sensor (12) an der Abstreifvorrichtung in der ersten Richtung (X) verschiebbar angeordnet ist.

12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) zur Messung der Position, der Leistung und/oder des Durchmessers des Strahls (4) ausgebildet ist.

13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) als Quadrantendetektor mit mindestens drei Detektor-
 20 sektoren (15, 16, 17) ausgebildet ist.

14. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) einen Einzeldetektor mit einer bis auf eine Blendenöffnung (23) Strahlungsundurchlässig abgedeckten, strahlungsempfindlichen Detektorfläche (21) auf-
 25 weist.

15. Vorrichtung nach Anspruch 13 und 14, dadurch gekennzeichnet, daß der Einzeldetektor im vierten Quadranten angeordnet ist.

16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 8 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Sensor (12) und/oder die Positioniervorrichtung (13) mit der Steuereinheit verbunden sind.

17. Verfahren zum Herstellen eines dreidimensionalen Objekts, bei dem aufeinanderfolgende Schichten eines durch elektromagnetische Strahlung verfestigbaren Materials aufgetragen und durch Bestrahlung mittels eines gebündelten Strahls an den dem Objekt entsprechenden Stellen der Schichten verfestigt werden, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung des Strahls bei der Verfestigung verändert wird.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit von der zu verfestigenden Stelle der Schicht verändert wird.

19. Verfahren nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß in einem einem Randbereich des Objekts entsprechenden ersten Bereich die Bündelung zur Bildung eines kleineren Fokus verstärkt wird und in einem einem Innenbereich des Objekts entsprechenden zweiten Bereich die Bündelung zur Bildung eines größeren Fokus verringert wird.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit von der Leistung der Strahlungsquelle für den gebündelten Strahl verändert wird.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 20,

dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit von einer Geschwindigkeit, mit der der gebündelte Strahl über die Schicht bewegt wird, verändert wird.

22. Verfahren nach einen der Ansprüche 17 bis 21, 5
dadurch gekennzeichnet, daß eine gepulste Strahlungsquelle verwendet wird und die Bündelung in Abhängigkeit von der Pulsenergie eingestellt wird.

23. Verfahren nach den Ansprüchen 19 bis 22, 10
dadurch gekennzeichnet, daß die Verfestigung im ersten Bereich mit einer starken Bündelung und einer niedrigen Geschwindigkeit und im zweiten Bereich mit einer schwächeren Bündelung und einer höheren Geschwindigkeit durchgeführt wird.

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß im zweiten Bereich die Strahlleistung 15
bzw. bei Verwendung eines gepulsten Lasers die mittlere Strahlleistung erhöht ist.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 24, 20
dadurch gekennzeichnet, daß die Position, die Leistung und/oder der Fokusedurchmesser des Strahls an einer Stelle vorzugsweise unmittelbar oberhalb der zu verfestigenden Schicht gemessen wird.

26. Verfahren nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Bündelung in Abhängigkeit vom 25
Meßergebnis verändert wird.

27. Verfahren nach Anspruch 25 oder 26, dadurch gekennzeichnet, daß das Meßergebnis mit vorgegebenen Referenzwerten verglichen wird und aufgrund des Vergleichs eine Korrektur des Strahls 30
vorgenommen wird.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 25 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Messung an einer Mehrzahl von Stellen vorgenommen wird.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

35

40

45

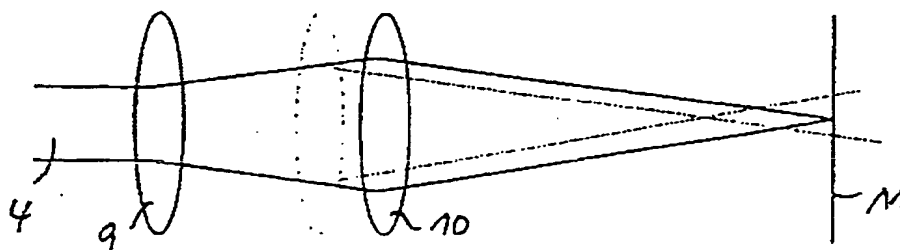
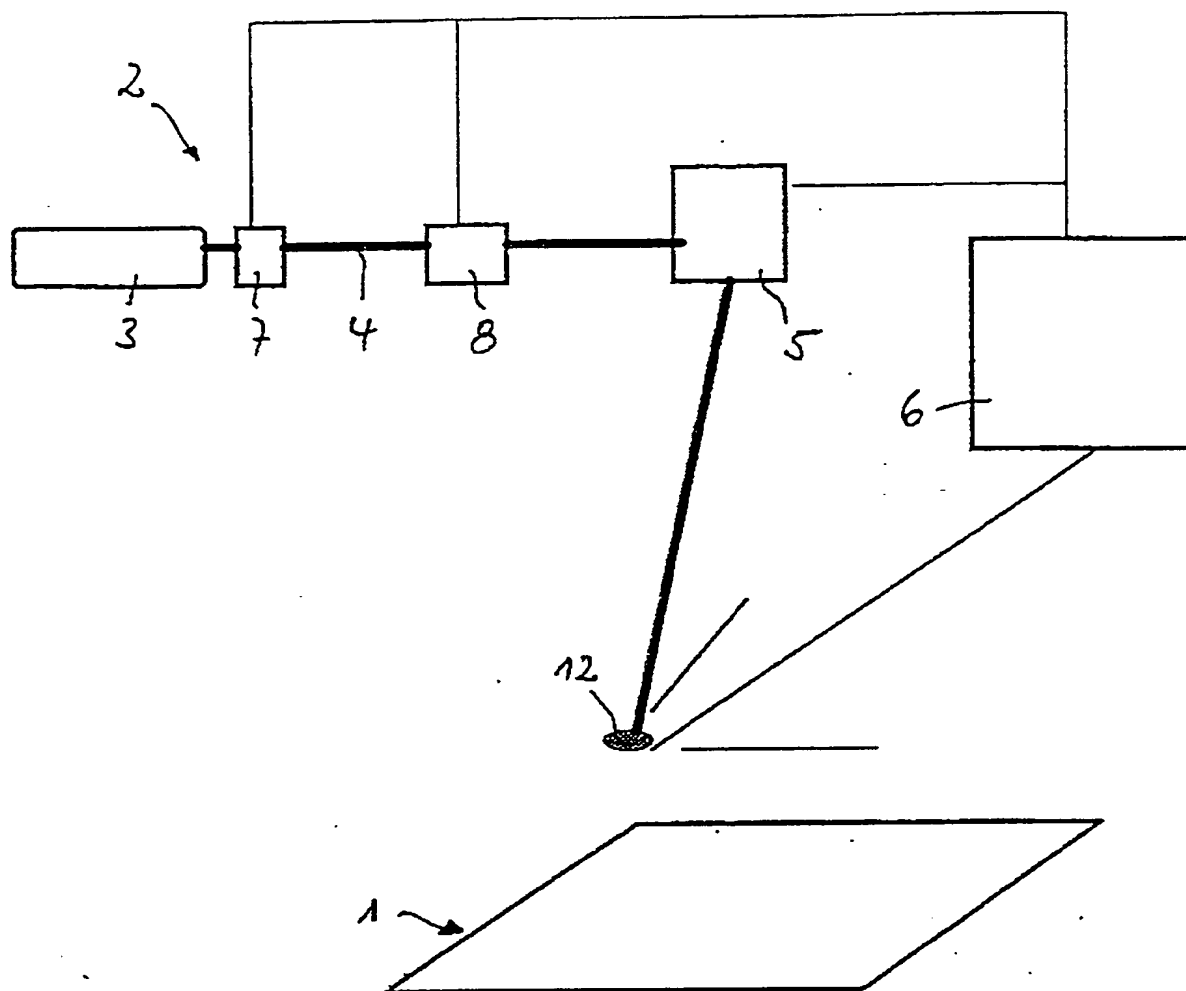
50

55

60

65

- L erseite -



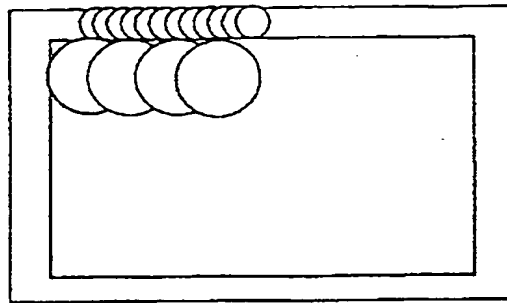


Fig. 3

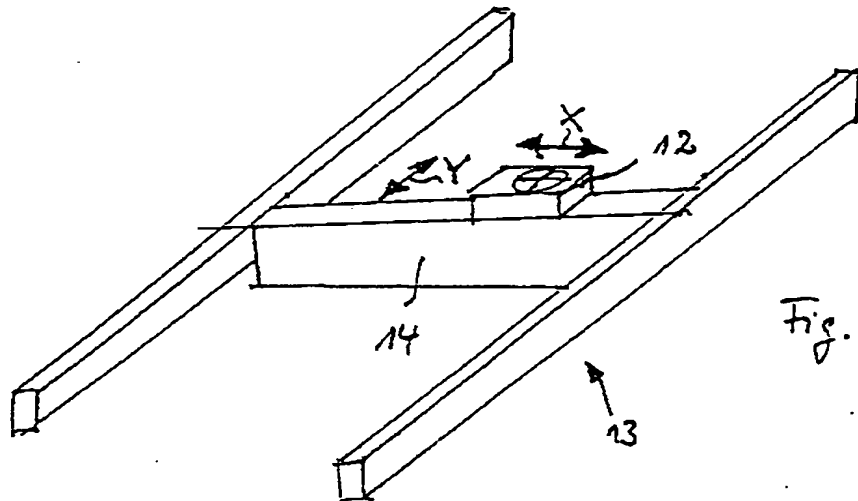


Fig. 4

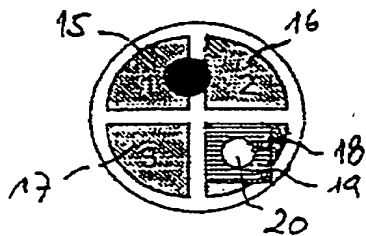


Fig. 5

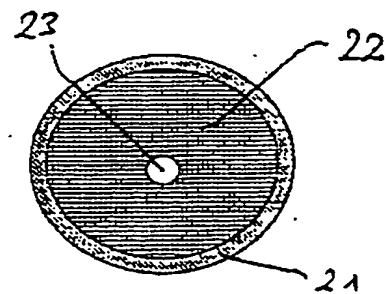


Fig. 6



12

Gebrauchsmuster

U1

- (11) Rollennummer G 93 19 405.6
- (51) Hauptklasse G03F 7/20
Nebeklasse(n) B29C 39/42 B29C 35/08
- (22) Anmeldetag 17.12.93
- (47) Eintragungstag 31.03.94
- (43) Bekanntmachung
im Patentblatt 11.05.94
- (54) Bezeichnung des Gegenstandes
Vorrichtung zur Herstellung eines
dreidimensionalen Objekts (Modells) nach dem
Prinzip der Photoverfestigung
- (73) Name und Wohnsitz des Inhabers
Forschungszentrum Informatik an der Universität
Karlsruhe, 76131 Karlsruhe, DE

17.12.93

Vorrichtung zur Herstellung eines dreidimensionalen Objekts (Modells) nach dem Prinzip der Photoverfestigung

5 Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Herstellung eines dreidimensionalen Objekts (Modells) nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

- 10 Zur direkten plastischen Modellierung dreidimensionaler Körper auf der Grundlage ihrer rechnerinternen Darstellung gibt es verschiedene Techniken, die auf dem Prinzip des schichtweisen Materialauftrags beruhen (Solid Freeform Manufacturing, SFM-Techniken). Die Grundlage eines Teils dieser Fertigungsverfahren ist das Aushärten von flüssigen, photosensitiven Photopolymeren durch die Bestrahlung mit Licht
- 15 (bezeichnet z.B. als Stereolithographie, Stereographie, Photosolidification etc.).

- Zu diesem Zweck wird ein nach den Methoden des "Computer Aided Design" generiertes CAD-Modell eines Objekts in horizontale Schnitte zerlegt. Das in einem Bad befindliche Photopolymer wird an seiner Oberfläche sukzessive mit den Mustern der
- 20 einzelnen Belichtungsquerschnitte belichtet. Nach dem Aushärten einer Schicht wird diese im Bad um den Betrag einer Schichtdicke abgesenkt und mit flüssigem Photopolymer überströmt. Anschließend wird die nächste Schicht belichtet. Nach dem Aushärten der letzten Schicht kann das fertige Objekt aus dem Bad entnommen werden.
- 25 Typischerweise funktioniert ein Stereolithographiesystem nach folgendem Bestrahlungsprinzip: Ein UV-Laser erzeugt die notwendige Strahlung. Eine Fokussiereinrichtung bündelt den Strahl auf einen Durchmesser, der im 1/10 mm-Bereich liegt. Ein mechanischer Ablenkspiegel positioniert den Strahl auf der Photopolymeroberfläche (Patentschrift EP 0 535 720 A2). Nachteile dieser Technik sind der hohe mechanische
- 30 Aufwand, die begrenzte Positioniergenauigkeit des Ablenkspiegels und insbesondere die mangelnde Eignung dieser Technik zur Herstellung feiner Strukturen mit lateralen Abmessungen im 1/100 mm-Bereich.

- Alternativ zur punkweisen Laserstrahlbelichtung gibt es auch die Möglichkeit, alle
- 35 Punkte einer Schicht gleichzeitig zu belichten (schichtweise Belichtung). Hierfür ist unbedingt eine Belichtungsmaske zur Erzeugung des Querschnittsmusters erforderlich. Eine mögliche Realisierung dieses Prinzips ist das Solider Verfahren der Firma Cubital

93.12.09

17.12.93

- Ltd. (EP 0 322 257 A2). Die Abbildung der Maske erfolgt durch kontaktfreie Proximitybelichtung. Als Lichtquelle dient eine UV-Lampe mit 2 kW Leistung. Als Belichtungs-
maske wird eine Glasplatte eingesetzt, die vor jedem Belichtungsschritt in einem
tonographischen Prozeß (vergleichbar dem Funktionsprinzip eines Laserdruckers)
5 geschwärzt wird. Nach jeder Belichtung muß die Glasplatte gereinigt und erneut für die
nächste Belichtung vorbereitet werden. Daraus resultiert ein sehr hoher gerätetechni-
scher Aufwand. Ein weiterer Nachteil ist die geringe Auflösungsgenauigkeit, die auf-
grund der kontaktfreien Proximitybelichtung beschränkt ist.
- 10 Stereolithographisch hergestellte Prototypen werden derzeit für folgende Anwendungen
eingesetzt: Sie dienen als Designmodell zur Veranschaulichung eines neuen Entwurfs
und sie können auch als Funktionsmodell oder als Urmodell für Folgeprozesse (z.B.
Gießprozesse) eingesetzt werden.
- 15 Bei den bekannten Stereolithographiesystemen treten hauptsächlich zwei Probleme auf:
1.) Die eingesetzte Lasertechnik bzw. Maskentechnik und der damit verbundene hohe
mechanische Aufwand bedingen einen sehr hohen Systempreis;
2.) Die Fertigungsgenauigkeit und die Größe der kleinsten herstellbaren Strukturen
reicht für die Herstellung von immer wichtiger werdenden Kleinstbauteilen, wie sie
20 z.B. in der Mikrosystemtechnik als Gehäuse eingesetzt werden, nicht aus.

Die vorliegende Erfindung soll zur Lösung der genannten Probleme beitragen. Sie
ermöglicht eine Vorrichtung, die, ausgehend von der rechnerinternen Repräsentation
des Objekts, das Herstellen von Bauteilen mit Strukturen im 1/100 mm-Bereich auf
25 direktem Wege nach dem Prinzip der Photoverfestigung erlaubt.

Die Aufgabe wird gelöst durch eine Vorrichtung gemäß den kennzeichnenden
Merkmale des Schutzanspruchs 1.

- 30 Die Erfindung basiert auf dem Prinzip der schichtweisen Belichtung mit Hilfe einer
Belichtungsmaske. Im Unterschied zu den bekannten Systemen wird jedoch ein kosten-
günstiges, rechnergesteuertes LCD (Flüssigkristallanzeige) als Belichtungsmaske ver-
wendet. Derzeit werden solche LCDs beispielsweise zur Overhead-Projektion einge-
setzt. Die gestellten Genauigkeitsanforderungen werden durch eine entsprechend
35 verkleinernde Projektion der Belichtungsmaske mit Hilfe eines Objektivs auf das
Photopolymer erreicht. Die Erfindung ermöglicht damit das Herstellen kleiner Bauteile
mit hoher Strukturauflösung und hohen Genauigkeitsanforderungen unter Beibehaltung

93.12.09

17.10.93

der bekannten Vorteile stereolithographischer Verfahren wie werkzeuglose Fertigung, Herstellung nahezu beliebiger geometrischer Formen und direkte Rechnerkopplung.

- 5 Besondere Ausgestaltungen und Weiterbildungen der vorliegenden Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

- Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung und ihr Funktionsprinzip wird anhand der nachfolgenden Beschreibung und der Figuren näher erläutert. Von den Figuren zeigt Fig. 1 den prinzipiellen Aufbau der Belichtungseinheit der Vorrichtung;
10 Fig. 2 eine mögliche Realisierung der Absenk- bzw. Anhebeeinheit der Vorrichtung gemäß Schutzanspruch 3; und
Fig. 3 eine vergrößerte Schnittdarstellung des Details A von Fig. 2.

- Die Fig. 1 zeigt eine Belichtungseinheit 14, deren Basiselement eine stabförmige
15 Lampe 1 (z.B. Halogenglühlampe) ist, die die notwendige Strahlung (Beleuchtung) erzeugt. Um eine homogene Ausleuchtung eines LCDs 3 zu erreichen, wird die Lampe 1 in einer Translationsbewegung senkrecht zu ihrer Längsachse und parallel zur Längsseite des LCDs 3 über den Querschnitt des LCDs 3 bewegt (vgl. Pfeil x). Dieser Vorgang kann mit dem Belichtungsvorgang verschiedener Kopiergeräte verglichen
20 werden. Weil der Kontrast des LCDs 3 (das ist das Verhältnis von Helltransmission zu Dunkeltransmission) stark von der Wellenlänge der Bestrahlung abhängt, ist ein spezieller Farbfilter 2 (z.B. Schott Farbgläser VG6, VG9, VG14) zur Bandbegrenzung der Strahlung notwendig. Das LCD 3 wird von einer Datenverarbeitungseinheit, z.B. einem Mikrorechner 6, angesteuert und zeigt jeweils das Muster M des Querschnitts der
25 zu belichtenden Schicht. Ein Objektiv 4 bildet dieses als Muster M' auf die Oberfläche eines photosensitiven Materials, eines Photopolymers 5, ab. Gemäß einer weiteren Ausgestaltung kann durch den Einsatz eines - nicht gezeichneten - Zoom-Objektivs jeweils objektspezifisch eine optimale Vergrößerung eingestellt werden. Die Belichtung größerer Objektquerschnitte kann ggf. nacheinander und schrittweise in Teilbelich-
30 tungen erfolgen.

- Von besonderer Wichtigkeit für die Funktionstüchtigkeit der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist die richtige Wahl der charakteristischen Wellenlänge der Bestrahlung. Zu ihrer Festlegung müssen die Emissionseigenschaften der Lichtquelle 1, die Trans-
35 missionseigenschaften des LCDs 3 und der Farbfilter 2 sowie die Verfestigungseigenschaften des Photopolymers 5 aufeinander abgestimmt werden. Bei der

03.10.05

17.12.93

Realisierung eines Prototypen einer erfindungsgemäßen Belichtungseinheit 14 erwies sich eine Wellenlänge von 530 nm (sichtbares grünes Licht) als optimal.

5 Zur Vervollständigung des gesamten Stereolithographiesystems nach der vorliegenden Erfindung ist neben der Belichtungseinheit 14 ein Behälter zur Aufnahme des flüssigen Photopolymers und eine Vorrichtung zum Absenken des bereits ausgehärteten Objekts vorzusehen.

10 Eine mögliche Realisierung dieser erfindungsgemäßen Einheit zeigt Fig. 2. Zu beachten ist, daß hier die Belichtungseinheit 14 auf den Kopf gestellt wird und die Strahlung 13 somit von unten nach oben gerichtet ist. Damit wird eine Belichtung des Photopolymers von unten erreicht. Eine Begrenzung des Photopolymers an der zu belichtenden Oberfläche - in diesem Fall ist die Oberfläche die Grenzfläche zwischen dem
15 Photopolymer und dem transparenten Glasboden 18 des Behälters 12 - durch eine Glasplatte ist sinnvoll, um eine möglichst plane Oberfläche zu erhalten. Auf diese Weise können Wellen, wie sie sich bei bekannten Stereolithographiesystemen mit Luft als Kontaktmedium an der zu belichtenden Oberfläche des Photopolymers bilden können, vermieden werden. Dies ist besonders wichtig im Hinblick auf die angestrebte
20 Fertigungsqualität, die mit Hilfe der vorliegenden Erfindung erreicht werden soll. Der Glasboden 18 trägt eine spezielle Beschichtung 17, vorzugsweise Teflon, die ein Anhaften des ausgehärteten Photopolymers 5 verhindert.

Ein einfaches Anheben des Objekts, vorzugsweise um den Betrag einer Schichtdicke s , ist aufgrund der auftretenden Kräfte infolge einer Sogwirkung u.U. nicht möglich.
25 Deshalb erfolgt die Anhebebewegung in drei Schritten - vgl. Fig. 3 - und zwar mittels einer auf Spindeltrieben aufbauenden Anhebevorrichtung 11, die zwei orthogonale Freiheitsgrade hat. Zuerst wird das Objekt (Modell) 16 horizontal über eine Stufe 19 des Glasbodens 18 (Pfeil a) geschoben. Auf diese Weise läßt sich erreichen, daß das Objekt 16 vollständig von flüssigem Photopolymer 5 umgeben wird, ohne daß
30 besondere Zugkräfte zur Überwindung der Sogwirkung aufgebracht werden müssen. Das Objekt 16 schwimmt. Gehalten wird es nur von der Grundplatte 15 der Anhebevorrichtung 11. Als nächstes folgt die eigentliche Anhebebewegung (Pfeil b) um den Weg s , bevor das Objekt 16 zuletzt mit einer waagrechten Bewegung (Pfeil c) wieder in die nächste Belichtungsposition gebracht wird. Nach dem Belichten der
35 letzten Schicht kann das fertige Objekt 16 dem Bad entnommen werden.

93.12.05

17.12.93

Bezugszeichen:

- | | | |
|----|----|---|
| | 1 | Lichtquelle |
| | 2 | Farbfilter |
| 5 | 3 | Flüssigkristallanzeige (LCD) |
| | 4 | (Projektions-) Objektiv |
| | 5 | flüssiges Photopolymer (photosensitives Material) |
| | 6 | Datenverarbeitungseinheit (Mikrorechner) |
| | 11 | Anhebevorrichtung |
| 10 | 12 | Behälter |
| | 13 | Strahlenbündel (Strahlung) |
| | 14 | Belichtungseinheit |
| | 15 | Grundplatte der Anhebevorrichtung |
| | 16 | Objekt (Modell) |
| 15 | 17 | Antihafbeschichtung |
| | 18 | Glasboden |
| | 19 | Stufe im Glasboden |
| | M | Muster des Belichtungsquerschnitts |
| | M' | projiziertes Bild von M |

9319405

17.12.93

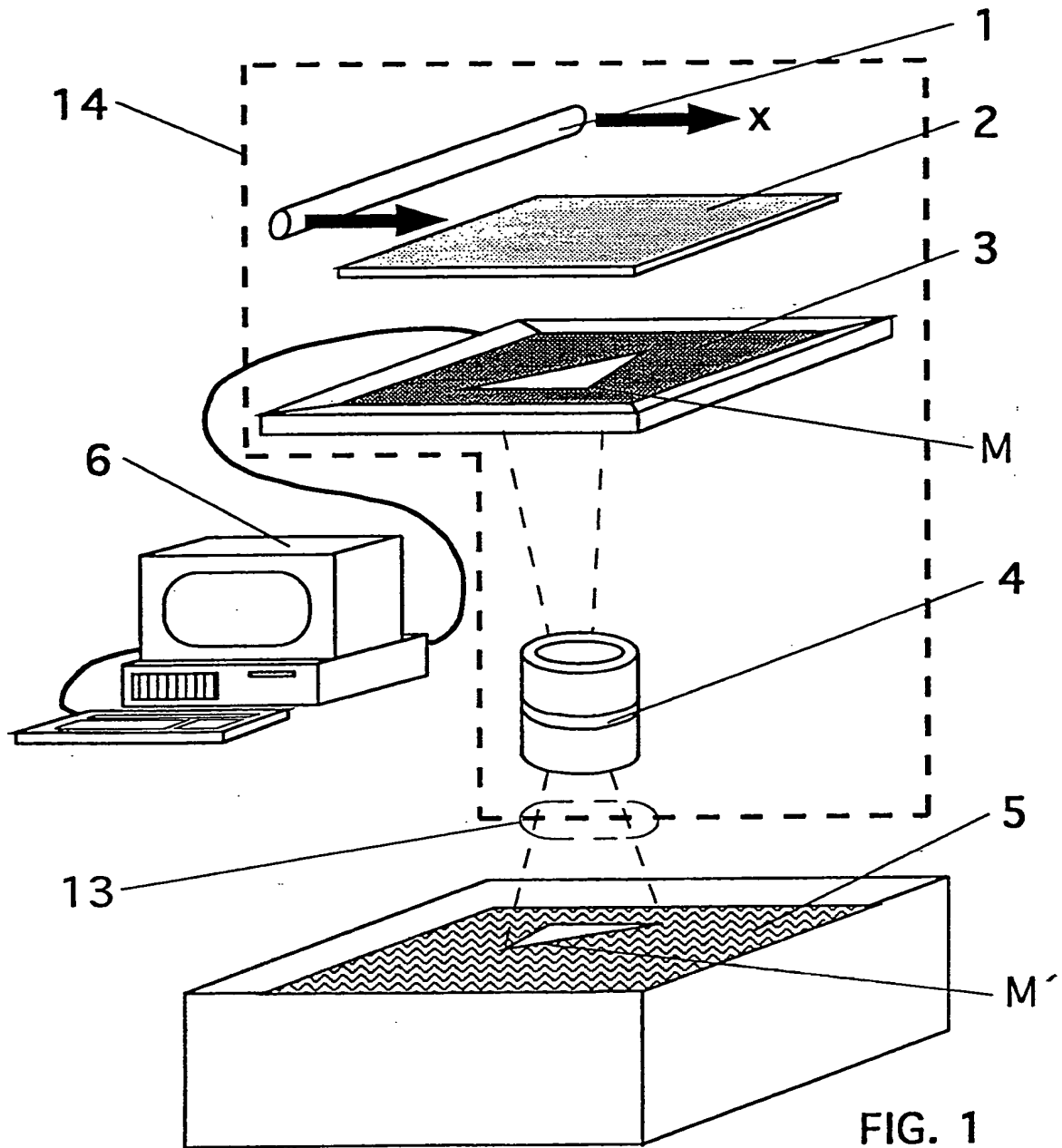
Vorrichtung zur Herstellung eines dreidimensionalen Objekts (Modells) nach dem Prinzip der Photoverfestigung

Schutzansprüche

- 5
1. Vorrichtung zur Herstellung dreidimensionaler Objekte durch sukzessive aufeinanderfolgende schichtweise Photoverfestigung übereinanderliegender Belichtungsquerschnitte des Objekts, bei dem auf eine bereits verfestigte Schicht in einem Bad aus zunächst flüssigem, durch Einwirkung von Strahlung verfestigbarem
- 10 Material entsprechend der Form des Objekts jeweils die nächste Schicht verfestigt wird, gekennzeichnet durch die Kombination folgender Elemente:
- a) eine Lampe 1,
- b) eine von der Lampe 1 ausgestrahlte rechnergesteuerte Transmissions-Flüssigkristallanzeige 3, vorzugsweise eine Overhead-Projektions-Flüssigkristall-
- 15 anzeige, zur Anzeige des aktuellen Belichtungsquerschnitts des Objekts 16,
- c) ein Objektiv 4 zur Abbildung des Belichtungsquerschnitts auf eine photosensitive Schicht,
- d) ein Behälter 12 zur Aufnahme des flüssigen Materials (Photopolymers 5) und
- e) ein Absenk bzw. Anhebemechanismus (Anhebevorrichtung 11) zur Positionierung
- 20 des Objekts 16 relativ zum Behälter 12 und damit zur photosensitiven Schicht.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bandbegrenzung der Strahlung zwischen der Lampe 1 und dem Objektiv 4 mindestens ein Farbfilter 2 angeordnet ist.
- 25
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Photopolymer 5 an der zu belichtenden Oberfläche von einer Glasplatte 18 mit einer Antihafbeschichtung 17 begrenzt ist.
- 30
4. Vorrichtung nach Anspruch 1, 2 oder 3 dadurch gekennzeichnet, daß das Objektiv 4 ein Zoom-Objektiv ist.
5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Lichtquelle 1 als vorzugsweise stabförmig geformte Glühlampe oder
- 35 Spezialleuchtstofflampe ausgebildet ist.

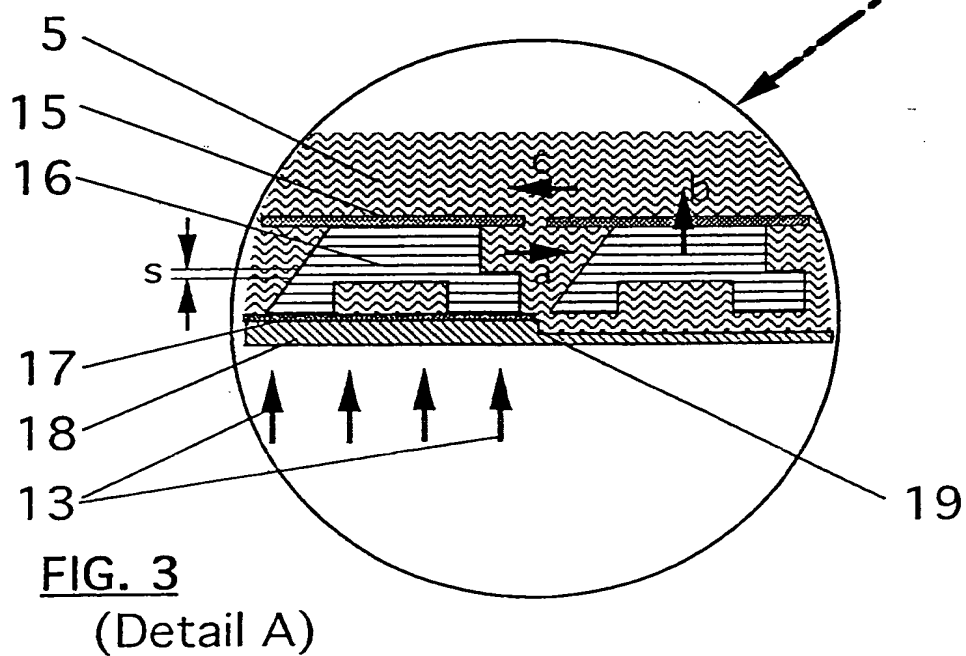
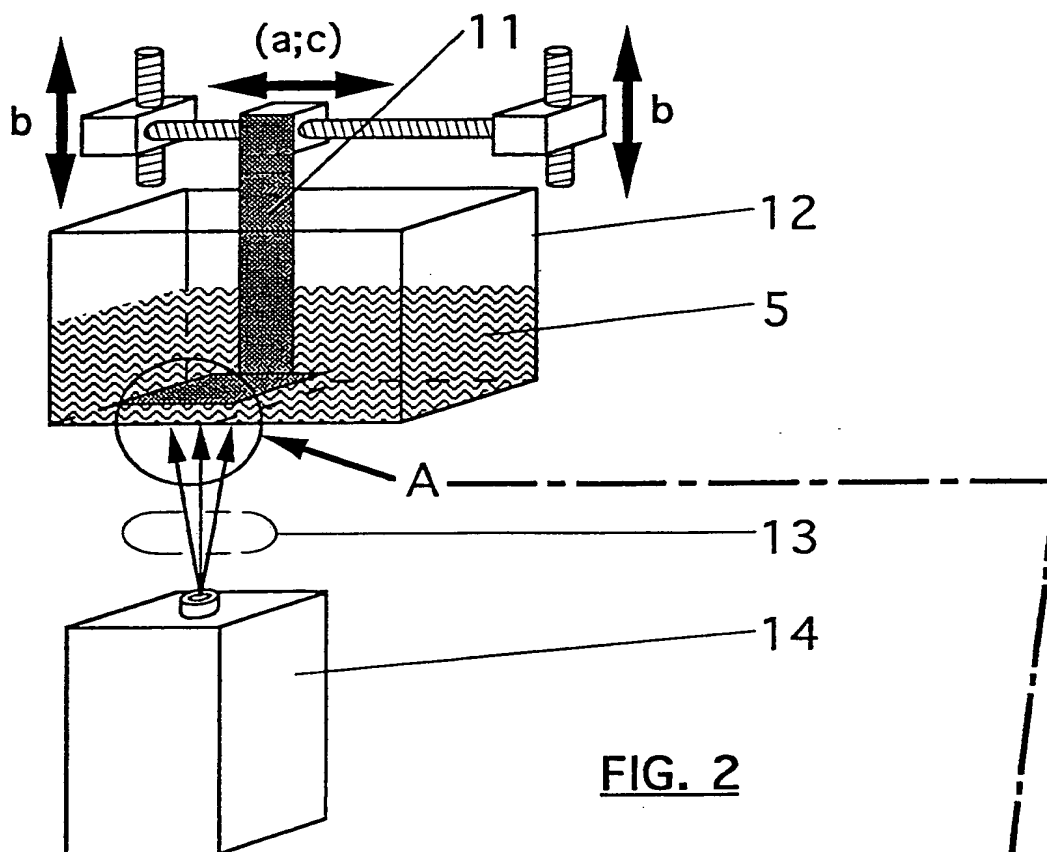
93.12.05

17.12.93



9319405

17.12.93



9319405

